

연성 물체의 미끄러짐 접촉을 포함한 데이터 기반 햅틱 모델링 및 렌더링

임성훈¹, 전석희², 최승문¹
¹포항공과대학교, ²경희대학교

Data-driven haptic modeling and rendering of frictional sliding contact with soft objects

Yim Sunghoon¹, Jeon Seokhee², Choi Seungmoon¹

¹Pohang University of Science and Technology (POSTECH), ²Kyunghee University
 e-mail: algorab@postech.ac.kr, jeon@khu.ac.kr, choism@postech.ac.kr

요 약

연성 물체의 햅틱 렌더링은 햅틱스의 의료 분야 응용에 필수적인 요소이다. 연성 물체의 사실성이 높은 햅틱 렌더링을 위한 방법 중의 하나로 실제 물체의 반응 힘과 거동을 측정하고 모델링한 뒤 렌더링에 이용하는 데이터 기반 햅틱 렌더링 방법이 있다. 본 논문에서는 비균일 조성을 가진 실제 물체와 sliding contact을 포함한 상호작용이 가능한 데이터 기반 햅틱 렌더링 방법을 제시하고 실제 렌더링 시의 성능을 확인해 보았다.

1. 서론

연성 물체의 햅틱 렌더링은 의료 훈련과 같은 분야에 사용하기 위해 필수적이다. 특히 높은 사실성을 가진 렌더링을 수행하기 위해서는 실제 물체의 복잡한 거동을 햅틱적으로 묘사 할 수 있어야 한다. 그러나 일반적인 물리 법칙을 표현하는 공식들을 이용한 연성 물체의 시뮬레이션은 계산량이 매우 많아 햅틱 렌더링에 사용하기에 문제가 있다. 이에 따라 실제 물체의 거동을 직접 측정한 뒤 측정 정보를 바탕으로 모델을 훈련 시켜서 햅틱 렌더링에 사용하는 데이터 기반 렌더링 방법들이 제시되어 왔다.

Mahvarsh와 Hayward는 연성 탄성 물체의 높은 사실성을 가진 햅틱 렌더링을 수행하기 위해서 미리 계산 또는 측정된 결과를 렌더링 하는 방법을 제시하였다[1]. Fong은 Mahvarsh와 Hayward의 방법을 확장하여 실제 물체의 형태와 햅틱 거동을 측정하는 시스템을 개발하였다[2]. 이 두 방법론들은 탄성 물체를 대상으로 하였다. 한편 Hover et al.은 조성이 균일한 점탄성 물체를 대상으로 측정 정보를 RBF로 모델링하여 햅틱 렌더링에 사용하는 방법을 제시하였다[3]. Sianov와 Harders는 조성이 균일하지 않는 점탄성 물체를 대상으로 측정 정보와 거동을 데이터 기반 렌더링에 사용할 수 있게 RBF로 모델링 하는 방법을 제시하였다[4].

현재까지의 연구들은 실제 물체를 대상으로 측정과 모델링을 수행하였지만 물체와 제한적으로만 상호작용 수 있었다. 예를 들어 물체를 누르는 상호 작용의 경우 모델링이 가능하지만, 물체의 표면을 미끄러지는 상호 작용의 경우, 물체를 누르는 상호 작용의 모델링 결과를 보간하여 사용하는 수준으로 제한

적이거나[1][2], 수행할 수 없는 경우가 있었다 [3][4]. 이에 따라 우리는 물체의 표면을 미끄러지는 경우도 모델링 하여, 데이터 기반 햅틱 렌더링이 가능한 방법론을 제시하고자 한다.

2. 데이터 기반 햅틱 렌더링을 위한 모델

2.1 데이터 기반 햅틱 렌더링을 위한 모델의 개요

데이터 기반 햅틱 렌더링의 기본은 실제로 측정된 값을 저장한 다음 이를 근사하여 제시하는 것이다. 이러한 측정 값을 잘 복원하기 위해서는 측정 값과 연관되는 물리적인 입력 정보가 잘 정의되어 있어야 한다. 이 물리적인 입력 정보를 색인으로 삼아 측정 값을 불러 오기 때문이다.

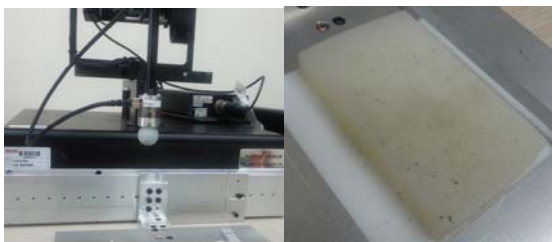
기존의 데이터 기반 햅틱 렌더링[1-4]에서는 현재 프로브의 위치와 최초 접촉 위치 사이의 프로브의 변위를 색인으로 이용하였다. 이는 탄성 물체에서 sliding 마찰력을 무시할 경우, 프로브가 물체에 수행한 일은 경로 의존성이 없는 특성을 갖고 있기 때문이다. 따라서 물체와 프로브의 최초 접촉 위치가 일정하다면, 현재 프로브의 위치가 물체의 변형을 표현하는 변위 장과 프로브와 물체 사이의 반응 힘을 결정하는 유일한 변수가 된다.

그러나 물체의 표면을 미끄러지는 거동을 모델링 할 경우에는 sliding 마찰력의 존재를 고려해야 한다. 이 환경의 물체와 프로브 사이의 반응 힘은 프로브의 이동 경로의 영향을 받으며, 이에 따라 이동 경로의 영향을 표현할 수 있는 변수를 추가로 필요로 한다. 이를 해결하기 위해 프로브의 위치와 최초 접촉 위치 사이의 프로브의 변위 중 이동 경로에 영향을

받는 변위와 받지 않는 변위로 나누어서 모델링에 이용하기로 한다.

2.2 모델링 환경

모델링 및 렌더링을 위해 그림 1의 좌측과 같이 Sensable PHANToM Premium 1.5 HF 햅틱 인터페이스에 ATI NANO17 6축 힘/토크 센서를 설치하였다. 센서의 끝에는 구형의 프로브를 설치하였다. 모델링 대상 물체는 내부 조성이 균일하지 않은 평면의 점탄성 물체를 대상으로 하였다. 본 논문에서는 그림 1의 우측에 있는 실리콘 블록을 대상으로 하였으며, 그 강성은 0.2~0.8 N/mm의 분포를 갖고 있었다. 이 블록은 바닥에 완전하게 고정되었다.



[그림 1] 모델링 환경과 대상

2.3 데이터 기반 햅틱 모델

물체와 상호 작용하는 프로브의 중심 위치를 \mathbf{p} 로 표현한다. 그 프로브의 속도는 $\dot{\mathbf{p}}$ 로 표현한다.

우리는 물체 표면과 프로브의 sliding contact을 표현하기 위해 변형되기 전의 물체 표면 위에 있는 프로브의 중심 위치인 프록시 \mathbf{q} 를 정의한다. 이 프록시 \mathbf{q} 는 물체의 변형이 제거되었을 때 현재 프로브의 중심이 위치하는 지점을 의미한다. 자세한 설명은 다음과 같다.

프로브와 물체가 접촉을 시작하였을 때의 프로브의 중심 위치를 \mathbf{p}_c 라고 하자. 이제 접촉이 진행되면서 물체의 변형이 발생하게 된다. 이 때 프로브 중심의 \mathbf{p}_c 를 기준으로 한 변위는 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{p} - \mathbf{p}_c = \int_{t_c}^t \dot{\mathbf{p}} dt .$$

이 변위를 탄성 변위 \mathbf{u}^e 와 소성 변위 \mathbf{u}^p 로 나누기로 한다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^e + \mathbf{u}^p .$$

이는 contact mechanics에서 slip 현상을 소성 변형과 유사하게 다루는 방법론을 프로브의 거동에도 적용한 것이다[5]. 일반적인 소성 변형의 경우 물체에 가한 스트레스가 항복면 (yield surface)이하일 경우 탄성 변형이 발생하다가 항복면을 넘어서는 순간 소성 변형이 발생한다. 이때 변형량을 탄성 변형과 소성 변형으로 분리할 수 있다. 한편 소성 변형이

발생한 후라도 스트레스를 제거하였을 경우 탄성 변형으로 인한 변형량은 다시 복원된다.

이 관계를 프로브와 물체 사이의 관계에 적용하면, 프로브와 물체가 slip하고 있지 않을 때 발생한 변위는 탄성 변위로 볼 수 있다. 이는 물체의 변형이 없어져 변형 이전의 상태가 되었을 때, 프로브의 위치가 복원되는 변위를 의미한다. 한편 물체와 프로브가 slip 상태 일 때 발생한 변위는 소성 변위로 취급할 수 있다. 이는 물체의 변형이 없어져도 프로브의 위치가 복원되지 않고 이동한 변위를 의미한다.

이에 따라 최초 접촉한 프로브의 중심 위치 \mathbf{p}_c 로부터 프로브의 소성 변위 \mathbf{u}^p 만큼 이동한 점을 프록시 \mathbf{q} 로 정의하기로 한다.

$$\mathbf{q} = \mathbf{u}^p + \mathbf{p}_c .$$

한편 이 프록시를 이용하면 물체의 탄성 변위는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{u}^e = \mathbf{p} - \mathbf{q} .$$

따라서 프록시 \mathbf{q} 를 이용하면 최초 접촉한 프로브의 중심 위치 \mathbf{p}_c 를 이용하지 않고 물체의 탄성 변위와 소성 변위를 표현할 수 있게 된다.

한편 물체에 저장된 탄성 에너지는 탄성 변위의 관계로 표현할 수 있다. 즉 프로브가 물체의 프록시 \mathbf{q} 에서 접촉을 시작하여 현재의 중심 위치 \mathbf{p} 에까지 다다른 경로를 통해 수행한 일이 탄성 에너지로 저장된다고 볼 수 있는 것이다.

최종적인 햅틱 모델은 다음과 같은 형태가 된다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{g}(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}, \mathbf{q}) .$$

프로브의 위치와 속도, 그리고 프록시의 위치를 입력으로 사용하며 함수의 결과 값인 힘은 주어진 조건에서 측정된 반응 값이다. 따라서 함수 \mathbf{g} 는 주어진 조건에 대한 반응 힘의 근사 함수이다. 이 근사 함수를 만들기 위해 우리는 radial-basis function (RBF)을 이용하였다[4].

2.4 데이터 기반 햅틱 모델을 위한 Slip-yield surface의 측정

데이터 기반 햅틱 모델의 입력 값으로 필요한 정보들은 현재 프로브의 위치 \mathbf{p} , 프로브의 속도 $\dot{\mathbf{p}}$, 프로브의 힘 센서로 측정된 합력 \mathbf{f} , 그리고 프록시의 위치 \mathbf{q} 이다. 이 중 프록시의 위치와 합력은 측정으로 바로 얻을 수 있는 값이고 프로브의 속도는 필터를 통해 얻을 수 있다[6]. 그러나 프록시의 위치 \mathbf{q} 는 추가로 추정해야 하는 값이 된다. 이는 물체와 프로브 사이의 sliding 마찰의 결과이다.

이를 추정하기 위해 프로브와 물체 사이의 Slip-yield surface를 측정하도록 한다. Slip-yield surfaces는 프로브가 물체에 가한 힘이 물체와 프로브 사이의 최대 정지 마찰력을 초과하여 slip이 발생하였을 때의 힘으로 표현할 수 있다. 이 slip-yield

surface는 다음과 같이 간접적인 방법으로 측정할 수 있다.

프로브와 물체를 \mathbf{p}_c 에서 최초 접촉시킨 상태에서, 프로브에 미리 정해진 수직 부하와 수평 부하를 가한다. 프로브와 물체 사이에 평형이 이루어져, 프로브의 이동 속도가 0이 되거나 프로브의 위치가 \mathbf{p}_c 에서 미리 정한 거리 밖으로 나갔을 경우, 현재 위치와 반응 힘을 측정하고, 프로브에 가한 수평 부하와 수직 부하를 제거한다. 이렇게 부하를 제거한 뒤에 물체 표면에 남은 프로브의 위치를 다시 측정한다. 이 위치를 \mathbf{p}_r 이라고 하자. 만약 측정된 \mathbf{p}_r 이 \mathbf{p}_c 와 차이가 있다면 어떠한 형태로든 프로브의 궤적들 사이에 slip이 발생한 지역이 있었다는 것이 된다.

한편 실제 측정에서는 프로브와 물체 사이의 범위 접촉으로 인해 프로브와 물체의 일부는 slip이 발생하지만 프로브의 전체에는 slip이 발생하지 않는 현상이 발생할 수 있다. 이 경우 \mathbf{p}_c 와 \mathbf{p}_r 사이에 차이가 발생하였지만 프로브는 물체와 완전하게 미끄러지지 않는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 완전한 slip 상태가 되는 것을 확인해야 한다. 이를 확인하기 위해 물체에 가한 부하와 $\|\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_c\|$ 사이의 관계를 확인한다. 물체와 프로브 사이에 완전한 slip이 발생하였다면 물체에 가한 부하에 관계 없이 $\|\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_c\|$ 의 크기가 증가하게 된다.

세부적인 측정 방법은 다음과 같다. 물체와 프로브 사이에 접촉을 발생시킨다. 그 다음 미리 계산한 방향과 크기의 부하를 가한다. 만약 프로브와 물체 사이에 평형이 이루어지면 부하를 제거하고 \mathbf{p}_r 의 위치를 측정한다. 그리고 다음에 가하는 부하의 크기를 증가시킨다. 만약 프로브와 물체 사이에 평형이 이루어 지지 않을 경우, 프로브가 미리 정의된 범위를 벗어 날 경우 부하를 제거하고 \mathbf{p}_r 의 위치를 측정한다. 그 다음은 부하의 크기를 유지하며, 프로브의 거동을 제한하는 범위를 증가시킨다. 이와 같은 접촉을 반복하면, 물체에 가한 부하와 $\|\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_c\|$ 사이의 그래프를 생성할 수 있다. 이 그래프에서 급격한 변화가 발생하는 지점을 추적하여, 그 때의 부하를 slip-yield surface로 이용한다. 한편 부하에 대응되는 프로브의 위치를 저장하여 slip-yield surface에 대응되는 elastic 변위를 저장할 수 있다.

이 slip-yield surface는 물체의 접촉 지점에 따라 형태가 다를 수 있다. 따라서 비교적 많은 수의 측정을 수행하고, 이들 측정 값을 보간하여 사용하도록 한다.

2.5 Slip-yield surface을 이용한 프록시 위치의 결정

Slip-yield surface를 측정하였다면 물체의 표면을 프로브로 자유롭게 탐색하면서 모델링을 수행한다. 이 때 프록시의 위치 \mathbf{q} 를 측정하기 위해서는 탄성 변위와 소성 변위를 측정하고 있는 동안 실시간으로 분리해야 한다. 현재의 측정 프레임의 인덱스를 i 라고 할 때, 매 측정 프레임 마다 변위의 변화량을 다음과 같이 표현한다.

$$\Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{u}^e + \Delta \mathbf{u}^p.$$

변위의 변화량을 탄성 변위의 변화량과 소성 변위의 변화량으로 구분하기 위해서 slip-yield surface를 이용한다. 현재 측정된 힘의 값이 slip-yield surface의 내부에 있는지, 아니면 경계나 외부에 있는지를 확인한다. 만약 slip-yield surface의 내부에 있다면 $\Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{u}^e$ 로 취급할 수 있다. 따라서 $\mathbf{u}_i^e = \mathbf{u}_{i-1}^e + \Delta \mathbf{u}^e$ 로 표현할 수 있다.

측정된 힘이 slip-yield surface경계나 외부에 있는 경우라면 측정 힘의 tangent 요소 방향으로 $\Delta \mathbf{u}^p$ 의 변화가 발생한다. 평면 물체를 대상으로 하고 있으므로 물체의 평면의 접선과 같은 방향을 향하는 힘의 요소 \mathbf{f}_i 를 이용하여 $\Delta \mathbf{u}^p$ 의 방향을 결정한다. 또한 $\Delta \mathbf{u}^p$ 의 크기는 전체 변위 $\mathbf{u}_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{q}_{i-1}$ 에서 미리 측정된 slip-yield surface에 대응되는 elastic 변위 \mathbf{u}^e 를 빼서 결정할 수 있다.

그에 따라 프록시의 위치는 다음과 같이 결정된다.

$$\mathbf{q}^i = \mathbf{q}^{i-1} + \Delta \mathbf{u}^p.$$

결정된 프록시의 위치는 현재 프로브의 위치와 속도와 측정된 힘 값과 함께 RBF를 계산하는데 이용한다.

2.6 RBF 모델의 생성

결정된 프록시의 위치는 현재 프로브의 위치와 속도와 측정된 힘 값과 함께 RBF를 계산하는데 이용한다. 이 RBF 모델링에 사용하는 방법은 Sianov와 Harder가 제시한 RBF 모델과 Random selection 방법론을 이용한다[4]. $\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}, \mathbf{q}$ 로 이루어진 벡터 \mathbf{r}_i 로 이루어진 측정 값과 각각의 축의 힘 f_i 의 값이 측정되어 있을 때, 데이터 기반 모델은 다음과 같은 RBF 함수로 표현할 수 있다.

$$f_i = \sum_{m=1}^N w_m \psi(\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_m\|), \quad i = 1 \dots N,$$

$$\psi(\|\mathbf{r}\|) = \|\mathbf{r}\|^3.$$

이 RBF를 Random selection 방법론을 이용하여 훈련 시킨다. 이 방법론을 이용한 결과 고차원의 정보도 충분히 잘 근사할 수 있었다.

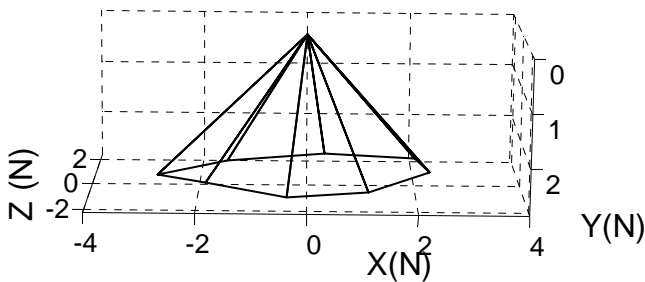
3. 데이터 기반 햅틱 모델의 성능 평가

데이터 기반 햅틱 모델의 성능 평가 및 렌더링은 2.2장에서 제시한 같은 모델링 환경과 동일한 환경과 인터페이스를 이용하였다. 동일 환경에서 모델링을 수행한 뒤에, 이 환경에서 자유롭게 거동하며, 측정된 값과 모델링 한 값을 비교하였다.

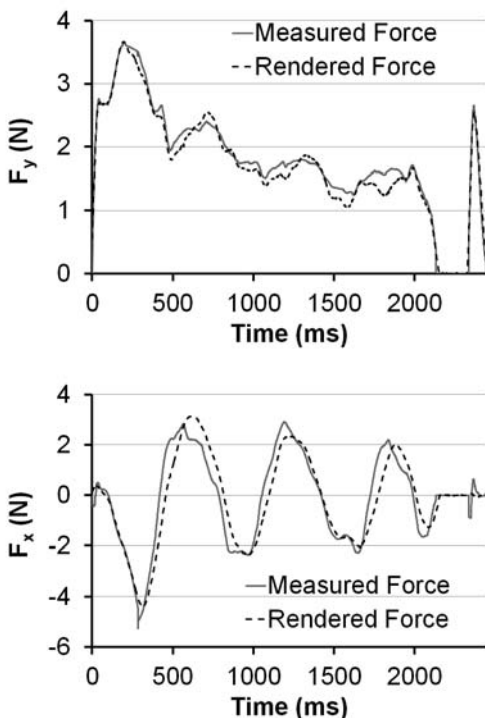
모델링에 이용한 물체는 그림 1 우측의 평면 실리 콘 블럭으로, 내부의 밀도에 차이를 두었다. 이 물체 중 중심부 $3 \times 3 \text{cm}^2$ 의 영역을 모델링 대상으로 삼았으며, 그 영역의 네 꼭지점의 지점에서 각각 slip-yield surface의 형태를 샘플링 하였다. Slip-yield

surface를 만들기 위해 최대 3 N의 힘을 수직 방향으로 제시하였고, 수평 방향으로도 약 3 N의 힘을 제시하였다. 측정된 Slip-yield surface의 형태는 그림 2와 같다. Slip-yield surface의 형태가 결정된 뒤에는 89,000개의 샘플을 측정하여 226개의 RBF함수의 조합으로 모델링을 수행하였다.

실제 물체의 표면을 자유롭게 탐색한 결과와 모델링 결과를 비교하여 보았다. 표면을 자유롭게 움직인 약 25,000개의 측정 값과 모델링 값을 비교하였을 때, RMSE 오차가 0.7 N의 수준이었다. 그림 3에서 프로브로 물체를 y축의 중력 방향으로 누른 상태에서 x축 방향으로 좌우로 움직였을 때의 측정 반응힘과 렌더링 힘 사이의 관계를 보여준다.



[그림 2] 측정된 Slip-yield surface



[그림 3] Sliding 거동의 측정 힘과 렌더링 힘

4. 결론

본 논문에서는 물체의 slip-yield surface를 측정하고 실시간으로 변위의 탄성 요소와 소성 요소를 분리한 뒤 RBF를 이용하여 물체의 거동과 반응 힘을 재현하는 방법론을 제시하였다. 이 방법은 기존의

sliding 접촉이 발생하지 않는 접촉의 샘플링만을 수행한 뒤 보간하는 방법에 비해 효과적으로 sliding 접촉의 모델링도 수행할 수 있었다. 현재는 평면의 단순한 물체를 대상으로 모델링을 수행하였으나 향후 더 복잡한 slip-yield surface의 모델을 적용하고 더 다양한 형태의 물체를 대상으로 확장할 계획이다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 및 방위사업청의 민군겸용기술사업 (과제번호: 12-DU-EE-03) 과 2010 년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2010-0019523) 을 받아 수행된 연구이다.

참고문헌

- [1] M. Mahvash, V. Hayward, "High fidelity passive force reflecting virtual environments." IEEE Trans. on Robotics, vol. 21, no. 1, pp.38-46, 2005.
- [2] P. Fong, "Sensing, Acquisition, and Interactive Playback of Data-based Models for Elastic Deformable Objects." International Journal of Robotics Research, vol. 28, no. 5, pp.630-655, 2009.
- [3] R. Hover, G. Kosa, G. Szekely, M. Harders, "Data-Driven Haptic Rendering—From Viscous Fluids to Visco-Elastic Solids", IEEE Trans. on Haptics, vol. 2, no. 1, pp. 15-27, 2009.
- [4] A. Sianov, M. Harders, "Data-driven haptics: Addressing inhomogeneities and computational formulation," in Proc. of World Haptics Conference (WHC), pp.301-306, 2013.
- [5] A. Curnier, "A theory of friction," International Journal of Solids and Structures, vol. 20, no. 7, pp.637-647, 1984.
- [6] F. Janabi-Sharifi, V. Hayward, C. J. Chen, "Discrete-time adaptive windowing for velocity estimation," IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol.8, no. 6, pp.1003-1009, 2000.